

漠河冻土区天然气水合物科学钻探 MK-2 孔 地层岩性的测井识别

肖 昆¹ 邹长春¹ 邱礼泉² 高文利² 项 彪¹

1. 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室(中国地质大学·北京) 2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所

肖昆等. 漠河冻土区天然气水合物科学钻探 MK-2 孔地层岩性的测井识别. 天然气工业, 2013, 33(5): 46-50.

摘 要 岩性识别是天然气水合物储层测井评价的基础, 准确的岩性识别结果可以为天然气水合物的勘探提供可靠的依据, 在寻找天然气水合物和评估天然气水合物储量方面发挥着巨大的作用。针对漠河冻土区天然气水合物科学钻探-2 孔(MK-2 孔)的钻探情况, 利用已钻井段地层的岩心资料和常规测井资料, 分别采用交会图法和支持向量机法对研究区的地层开展了岩性识别研究。结果表明: 研究区内有砂岩、泥岩、石灰岩、糜棱岩和泥质板岩 5 种岩石, 其不同岩性的测井响应差异能够定性识别岩性; 自然电位与电阻率测井参数的交会, 能够有效的、定量识别研究区地层的岩性; 支持向量机法所建立的岩性识别模型, 对研究区地层的岩性识别率可达 96.67%。所建立的测井识别方法较好地解决了该区地层岩性识别问题, 也为类似地区的天然气水合物地层测井评价提供了一种重要的手段。

关键词 漠河 冻土区 天然气水合物 测井解释 交汇图法 支持向量机法 岩性 识别

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2013.05.008

Well-log lithology identification in well MK-2 for scientific drilling and exploration of gas hydrate in Mohe permafrost, China

Xiao Kun¹, Zou Changchun¹, Qiu Liquan², Gao Wenli², Xiang Biao¹

(1. Key Laboratory of Geo-detection, Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 33, ISSUE 5, pp. 46-50, 5/25/2013. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Lithology identification is the basis of logging evaluation of gas hydrate reservoirs and its accurate information will provide a reliable foundation for gas hydrate exploration, thus it plays a big role in searching for gas hydrate and estimating gas hydrate reserves. In view of the well MK-2 for scientific drilling and exploration of gas hydrate in Mohe permafrost, we performed lithology identification by using the cross plotting method and the Support Vector Machine (SVM) method based on the core data and conventional logging data. Five lithologic categories were identified in the study area, including sandstone, mudstone, limestone, mylonite and argillaceous slate. These lithologies can be qualitatively identified according to their logging response differences and they can also be quantitatively identified through the cross plotting of SP vs. resistivity logging. The lithology identification model built with the SVM method can recognize the lithologies in the study area with an accuracy ratio of up to 96.67%. These methods successfully solve the problem of lithology identification in the study area and can be also used in logging evaluation of gas hydrate reservoirs in such areas with similar geologic conditions.

Key words: Mohe, permafrost, gas hydrate, logging interpretation, cross plotting method, Support Vector Machine (SVM) method, lithology, identification

基金项目: 中国地质调查局天然气水合物勘查与试采专项(编号: GZHL20110321)、国家自然科学基金项目(编号: 41274185)。

作者简介: 肖昆, 1987 年生, 博士研究生; 主要从事地球物理测井资料处理与解释方面的研究工作。地址: (100083) 北京市海淀区学院路 29 号。电话: (010) 82320692。E-mail: xiaokun0626@163.com

天然气水合物是由水分子和天然气(通常以甲烷为主)构成的笼型结构固态晶体,主要赋存于海底和极地永冻土中^[1]。在陆地,天然气水合物赋存于地下200~2 000 m的永冻土地区^[2];在大洋,天然气水合物赋存于300~3 000 m的深水盆地、陆架坡折带等天然气水合物稳定域内^[3]。天然气水合物作为一种储量巨大、洁净的新型替代能源而受到普遍的关注,目前世界上已经在100多个地区间接或直接发现了天然气水合物赋存区。我国于2007年5月在南海神狐海域成功获取天然气水合物样品,并于2008年11月在祁连山冻土区首次钻获天然气水合物样品^[4-5]。近几年在漠河多年冻土区开展了系统的地质、地球物理、地球化学等调查工作,研究结果显示该区域具有天然气水合物成藏的良好前景^[6]。这些研究成果都大大推动了我国天然气水合物研究进程。

中国地质大学(北京)测井实验室参与了漠河冻土区MK-2孔天然气水合物地球物理综合测井工作,取得了自然伽马、自然电位、电阻率、中子、密度、声波时差等13种测井数据。岩心编录资料显示,MK-2孔已钻井段地层的岩性主要发育泥岩、砂岩和石灰岩等沉积岩内,同时在其中夹有糜棱岩、板岩等变质岩。天然气水合物赋存于沉积岩中^[7-8],且以多种方式存在:①占据大的岩石粒间孔隙;②以球粒状散步于细粒岩石中;③以固体形式填充在裂缝中;④大块固态水合物伴随少量沉积物。当沉积岩中赋存有天然气水合物时,电阻率测井和声波测井曲线响应最为明显,被认为是识别天然气水合物的最有效方法^[9]。与饱和水或游离气的沉积岩地层相比,天然气水合物赋存层位在电阻率测井曲线上表现为相对高值,声波时差测井曲线表现为低值,自然伽马曲线表现为低值,中子孔隙度测井曲线略微增加,密度测井曲线略有降低,孔径曲线表现为扩径^[10]。以上这些特征可以用来从沉积岩层中定性识别出天然气水合物储层。为了从沉积岩中识别和判断天然气水合物,故首先需要划分出研究区井段地层的岩性。国内学者利用测井技术识别沉积岩地层方面研究较多,而在识别变质岩地层方面研究较少^[11-12]。为了更好地利用测井资料对漠河冻土区地层开展测井评价,也有必要对该井段地层岩性识别进行研究。

在利用测井资料进行岩性识别方面,传统的方法主要有两种:交会图快速识别和统计学方法。基于计算机技术的方法主要有:BP神经网络法、模糊识别法、支持向量机法等。前人利用上述方法或者相关改进方法应用在实际地区岩性识别中取得较好效果。笔者试

图采用交汇图法和支持向量机法对研究区井段地层岩性进行识别,总结出不同岩性的测井响应特征,优选出适合该井段地层的测井交会参数,建立支持向量机方法的岩性识别模型,为研究区利用测井资料进行地层评价的后续研究提供技术支持。

1 区域地质概况

漠河地区主要发育的漠河盆地地处我国大兴安岭北部,横跨黑龙江省和内蒙古自治区,地处北纬52°20'以北。漠河盆地为一中生代陆相盆地,泥盆系为其基底,之上充填了一套中上侏罗统的河湖相碎屑岩和火山岩沉积,上为少量下白垩统和新生界覆盖^[6]。地层厚度超过6 000 m,中侏罗统是其主体,主要为一套河湖相的陆源碎屑沉积,沉积物中积累大量有机质,为细菌将其降解成甲烷气提供物源。盆地内发育大量北东—北北东向逆掩断裂及其伴生断裂,具有坳隆相间、凹凸交替的构造格局^[13]。广泛发育的断裂为天然气水合物形成所需的烃类气体的运移开辟了有利通道,隆起或凸则为天然气水合物的聚集提供了绝佳的场所。

MK-2孔位于黑龙江省漠河县境内,为多年永久冻结区,前人的研究认为这一地区的多年冻土厚度具有向北增大的规律,厚度为20~80 m,最厚可超过140 m,地表温度-0.5~-3.0℃,地温梯度1.6℃/100 m,具有与已发现天然气水合物地区类似的地温条件^[6]。

2 MK-2孔测井响应特征

测井参数值是地下岩石的矿物成分、结构和孔隙度等的综合反映,是岩性分析的基础资料,对于一组特定的测井参数值,它必然对应着地层中的某一种或某几种岩性。利用测井资料划分岩性就是根据测井曲线的形态特征与测井曲线值来定性划分。其具体方法就是在分析岩心和测井参数对应特征的基础上划分岩心的岩性,并从各种岩性中读取能够代表岩样特征的测井参数值,确定岩性与测井参数的对应关系。

根据研究区岩心编录资料将研究区岩石类型划分为5种:砂岩、泥岩、石灰岩、糜棱岩、泥质板岩。通过对MK-2孔已钻井段的测井资料和岩心编录资料进行分析,优选出能够反映岩性变化的测井参数,最终确定中子孔隙度(CNL)、自然伽马(GR)、自然电位(SP)、电阻率(RT)、密度(DEN)和声波时差(AC)等6种测井曲线作为岩性识别的特征参数。统计出MK-2孔已钻井段的同一岩性在不同井段的测井响应值,总结出MK-2孔地层岩性的测井响应特征。

对于常规测井,不同岩性对同一测井参数的响应不同(表 1),根据这些数值特征,结合漠河冻土区地层岩性的特点,总结出该井段地层岩性的测井响应特征。

对于砂泥岩剖面为主的地层,自然电位参数一般选取泥岩段作为基线,其他岩性相对泥岩基线右偏则定义为正异常,相对泥岩基线左偏则定义为负异常。因此在归纳不同岩性的测井响应特征时,自然电位参

数单独讨论。其他 5 个测井参数由于一般定义为相对高低(大小),故综合总结出这 5 个测井参数对不同岩性的测井响应特征。

对于自然电位参数,相对于泥岩层段,砂岩的测井响应显示为负异常,石灰岩的测井响应显示为负异常,糜棱岩的测井响应显示为负异常,泥质板岩的测井响应显示为正异常。

表 1 MK-2 孔不同岩性测井响应平均值统计表

岩性	CNL	GR/ API	SP/ mV	RT/ ($\Omega \cdot m$)	DEN/ ($g \cdot cm^{-3}$)	AC/ ($\mu s \cdot ft^{-1}$)
砂岩	1.91%	40.42	282.49	925.81	2.42	107.55
泥岩	1.22%	56.20	297.91	17.68	2.23	113.02
石灰岩	1.14%	23.84	137.71	1 982.27	2.77	124.61
糜棱岩	1.80%	44.40	210.86	1 203.16	2.51	107.83
泥质板岩	0.77%	51.26	516.30	12.64	2.08	123.43

注:1 ft=0.304 8 m

对于其他 5 个测井参数,砂岩的测井响应具有“四高两低”的特征,在测井曲线上表现为高中子、高电阻率、高密度、低自然伽马、低声波时差;泥岩的测井响应具有“两高三低”的特征,在测井曲线上表现为高中子、高自然伽马、低电阻率、低密度、低声波时差;石灰岩的测井响应应具有“三高两低”的特征,在测井曲线上表现为高电阻率、高密度、高声波时差、低中子、低自然伽马;糜棱岩的测井响应具有“三高两低”的特征,在测井曲线上表现为高中子、高电阻率、高密度、低自然伽马、低声波时差;泥质板岩的测井响应具有“两高三低”的特征,在测井曲线上表现为高自然伽马、高声波时差、低中子、低电阻率、低密度。

根据以上总结的不同岩性的测井响应差异,可以用于研究区利用常规测井曲线快速直观地进行岩性识别(图 1)。对于自然伽马曲线,石灰岩层段显示低值,糜棱岩层段显示低值,泥岩层段显示高值;对于电阻率曲线,石灰岩层段显示高值,糜棱岩层段显示高值,泥岩层段显示低值;对于中子孔隙度曲线,石灰岩层段显示低值,糜棱岩层段显示高值,泥岩层段显示高值;对于声波速度曲线,石灰岩层段显示低值,糜棱岩层段显示高值,泥岩层段显示高值。

3 交会图法识别 MK-2 孔地层岩性

交会图法是把 2 种测井数据在平面图上交会,根据交会点的坐标定出所求参数的数值和范围的一种方法。测井数据交会图法可以将测井信息转换为地质参数,是识别含油气盆地地层岩性简单而有效的方法。

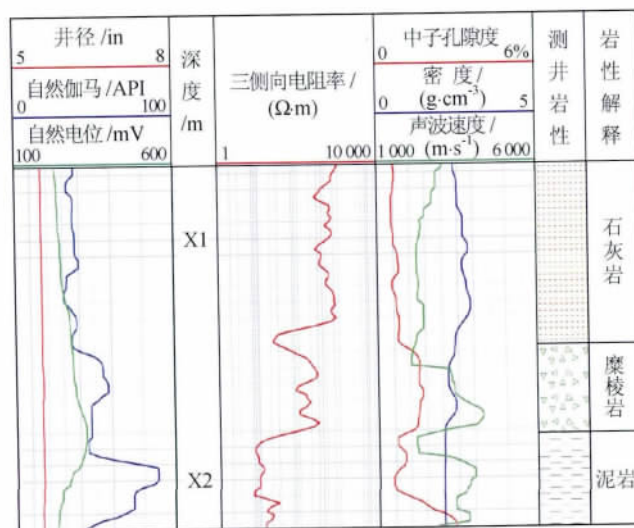


图 1 MK-2 孔不同岩性测井响应特征图
(注:1 in=25.4 mm)

在交汇图上能直观地看出各种岩性的分解和所分布的区域,从而达到识别岩性的目的。

根据岩心编录资料,确定 MK-2 孔各种岩性在不同深度段的分布,将这些层段中的每个深度段的测井响应值取平均,然后依照岩性的不同,统计出各种岩性常规测井的响应值,绘制测井属性交会图。综合各种参数交会图的分析可知,自然电位与电阻率交会能够有效地识别研究区井段地层的岩性,识别效果最好(图 2);中子与自然电位交会、自然伽马与自然电位交会只能识别研究区井段地层的部分岩性,识别效果一般(图 3、4);其他测井参数的交会,由于各种数据重叠在一

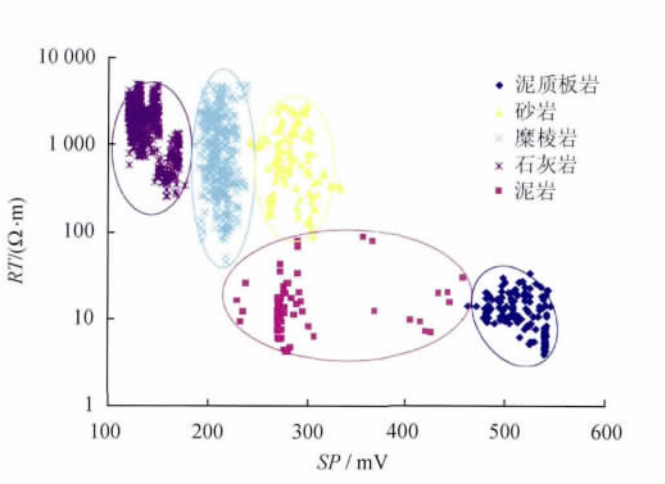


图 2 SP 与 RT 交会图

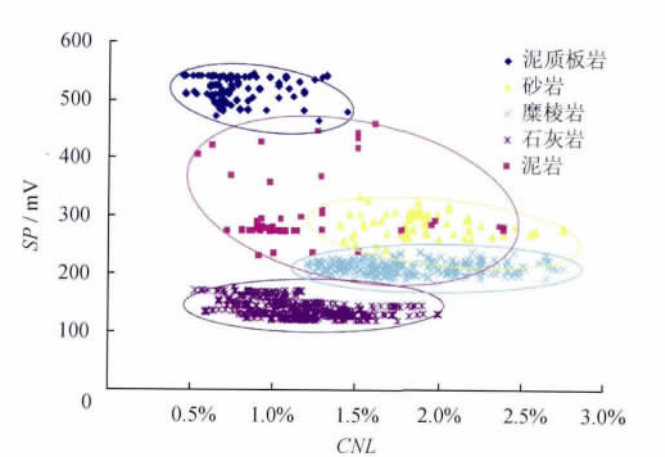


图 3 CNL 与 SP 交会图

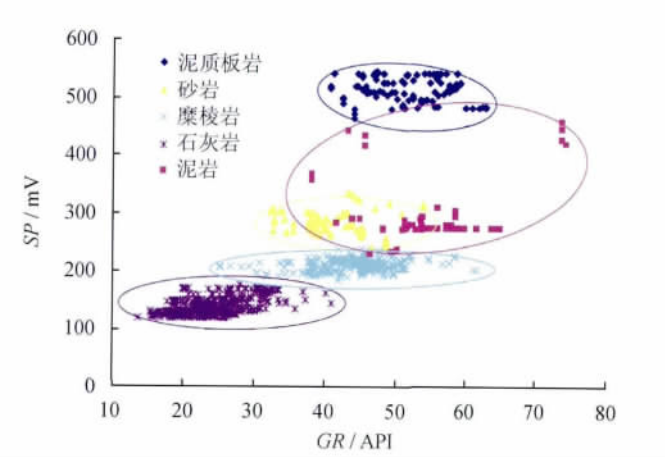


图 4 GR 与 SP 交会图

起,不具有分区性,不能有效地识别该井段地层的岩性,此处不做研究。

4 支持向量机法识别 MK-2 孔地层岩性

支持向量机是 20 世纪 90 年代中期发展起来的,它是建立在结构风险最小化原则以及 VC 维概念基础

上的一种有限样本统计学习理论,其基本思想是通过核函数将样本空间映射到特征空间,在特征空间中求出原样本的最优分类面。由于该算法能够在模型的复杂性和学习能力之间寻求最佳折中,所以具备非常好的泛化能力。目前该方法能够解决模式识别中的小样本、非线性及高维问题,已经应用于测井岩性识别中取得较好效果^[14-15]。

4.1 岩性识别参数的选择

作为支持向量机岩性识别模型的输入特征参数,测井资料的选择对于支持向量机岩性识别模型的识别率有很大的影响,因此首先应优选出能够较好反映岩性的测井曲线。参照前面测井响应分析和交汇图法确定的岩性敏感测井参数,选择 CNL、GR、SP、RT、DEN、AC 等 6 种测井曲线作为支持向量机岩性识别模型的输入特征参数。

4.2 数据归一化处理

不同测井曲线所代表的数据在取值范围上有较大的差异,而且数据量纲也不一致,如果直接用作学习样本会使得收敛速度很慢;更重要的由于取值较大的数据对学习过程将起到决定性作用,使得数值较小的变化不敏感,从而导致学习精度的降低。因此,在进入支持向量机岩性识别模型之前,无论是学习样本还是检验样本数据,都需要进行归一化处理,将它们刻度在统一的数值量纲范围内。本次选取 20 个经归一化的数据作为支持向量机岩性识别模型的学习样本。

4.3 支持向量机岩性识别模型学习与检验

支持向量机岩性识别模型的输入特征参数曲线有 6 种,即学习样本维数为 6,需要区分的岩性有 5 类,即分类数为 5,由此建立样本空间为 6 维 5 类。根据前人^[14-15]对核函数选取的研究,认为径向基核函数(RBF)效果最好,故本次研究采用 RBF 作为核函数。对于核函数中的惩罚程度参数 C 和参数 γ ,采用网格搜索来训练参数 C 和 γ ,用交叉验证法对目标函数进行寻优,以此确定最佳的参数使交叉验证的精度最高。利用学习样本的数据来进行学习,最终确定 $C=0.5, \gamma=0.031$ 。

另外随机选取 30 个岩性归一化数据点,作为支持向量机岩性识别模型的检验样本。将这 30 个样本数据送入已经训练好的支持向量机岩性识别模型进行岩性识别,识别结果为 30 个检验样本的支持向量机岩性识别结果只错判一个,识别率 96.67%。

5 结论

1)建立了 MK-2 孔井段地层 5 种岩性的测井响应

特征,从而可以利用不同岩性测井响应差异来定性识别岩性。

2)利用交汇图技术确定自然电位与电阻率交会能够有效识别出 MK-2 孔井段地层的 5 种岩性。

3)利用支持向量机法建立了 MK-2 孔岩性识别模型,对研究区井段地层岩性样本的识别率达到 96.67%。

4)交会图法和支持向量机法对于 MK-2 孔地层岩性识别是有效和可靠的,对漠河冻土区天然气水合物地层测井评价具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] SLOAN E D. Clathrate hydrates of natural gases[M]. New York: Marcel Dekker, 1990.
- [2] 史斗,孙成权,朱岳年. 国外天然气水合物研究进展[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1992.
SHI Dou, SUN Chengquan, ZHU Yuenian. Foreign gas hydrate research progress[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1992.
- [3] 狄永军,郭正府,李凯明,等. 天然气水合物成因探讨[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 138-141.
DI Yongjun, GUO Zhengfu, LI Kaiming, et al. Discussion of the origin of gas hydrates[J]. Advances in Earth Science, 2003, 18(1): 138-141.
- [4] 祝有海,赵省民,卢振权. 中国冻土区天然气水合物的找矿选区及其资源潜力[J]. 天然气工业, 2011, 31(1): 13-19.
ZHU Youhai, ZHAO Xingmin, LU Zhenquan. Resource potential and reservoir distribution of natural gas hydrate in permafrost areas of China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(1): 13-19.
- [5] 坚润堂,李峰,王造成. 青藏高原冻土区活动带天然气水合物异常特征[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(2): 13-17.
JIAN Runtang, LI Feng, WANG Zaocheng. The gas hydrate abnormality in the movable zone of the Qinghai-Tibet Plateau permafrost[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2009, 31(2): 13-17.
- [6] 赵省民,邓坚,李锦平,等. 漠河多年冻土区天然气水合物的形成条件及成藏潜力研究[J]. 地质学报, 2011, 85(9): 1536-1550.
ZHAO Xingmin, DENG Jian, LI Jinping, et al. Gas hydrate formation and its accumulation potential in Mohe permafrost area, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(9): 1536-1550.
- [7] COLLETT T S. Energy resource potential of natural gas hydrates[J]. AAPG, 2002, 86(11): 1971-1992.
- [8] 孟庆国,刘昌岭,业渝光,等. 不同类型天然气水合物真空分解过程实验研究[J]. 现代地质, 2010, 24(3): 607-613.
MENG Qingguo, LIU Changling, YE Yuguang, et al. Experimental research on dissociation kinetics of different gas hydrates[J]. Geoscience, 2010, 24(3): 607-613.
- [9] TREHU A M, BOHMANN G, RACK F R, et al. Proceedings of the ocean drilling program Leg 204, Initial Reports[R]. College Station, Texas Ocean Drilling Program, 2003.
- [10] 宋海斌,江为为,张文生,等. 天然气水合物的海洋地球物理研究进展[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 224-229.
SONG Haibin, JIANG Weiwei, ZHANG Wensheng, et al. Progress on marine geophysical studies of gas hydrates[J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(2): 224-229.
- [11] 王祝文,刘菁华,李舟波,等. 中国大陆科学钻探预先导孔-II 岩性剖面重建方法研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2002, 32(3): 290-293.
WANG Zhuwen, LIU Jinghua, LI Zhoubo, et al. Research on lithology profile reconstruction method from the pre-pilot hole II of the Chinese continental scientific drilling (CCSD-PP2)[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2002, 32(3): 290-293.
- [12] 朱留方,吴海燕,翟勇. 太古界变质岩储集层测井资料综合评价[J]. 天然气工业, 2005, 25(11): 39-42.
ZHU Liufang, WU Haiyan, ZHAI Yong. Comprehensively evaluating the log data of Archeozoic erathem metamorphics reservoir[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(11): 39-42.
- [13] 张顺,林春明,吴朝东,等. 黑龙江漠河盆地构造特征与成盆演化[J]. 高校地质学报, 2003, 9(3): 411-418.
ZHANG Shun, LIN Chunming, WU Chaodong, et al. Tectonic characteristics and basin evolution of the Mohe Basin, Heilongjiang province [J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9(3): 411-418.
- [14] 张尔华,关晓巍,张元高. 支持向量机模型在火山岩储层预测中的应用——以徐家围子断陷徐东斜坡带为例[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 428-432.
ZHANG Erhua, GUAN Xiaowei, ZHANG Yuangao. Support vector machine in volcanic reservoir forecast: East slope in Xujiaweizi Depression[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 428-432.
- [15] ROLI F, FUMERA G. Support vector machines for remote sensing image classification [J] // Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2001, 4170: 160-166.

(修改回稿日期 2013-02-01 编辑 韩晓渝)